



# Analyse expérimentale et modélisation du comportement thermomécanique d'un assemblage composite-polymère

V. T. Phan, Jean-Yves Cognard, D. Choqueuse, Laurent Sohier

## ► To cite this version:

V. T. Phan, Jean-Yves Cognard, D. Choqueuse, Laurent Sohier. Analyse expérimentale et modélisation du comportement thermomécanique d'un assemblage composite-polymère. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.103. hal-00598151

**HAL Id: hal-00598151**

**<https://hal.science/hal-00598151>**

Submitted on 4 Jun 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Analyse expérimental et modélisation du comportement thermomécanique d'un assemblage composite-polymère

## *Experimental analysis and modelling of the thermomechanical behavior of composite-polymer joint*

V. T. Phan<sup>1,2</sup>, J.Y. Cognard<sup>1</sup>, D. Choqueuse<sup>2</sup>, L. Sohier<sup>3</sup>

1 : LBMS, ENSTA Bretagne (ex ENSIETA), 29806 Brest

2 : Service Matériaux et Structures, IFREMER, 29280 Plouzané

3 : LBMS, Université de Bretagne Occidentale 29285 Brest

e-mail : Van\_Trung.PHAN@ensta-bretagne.fr

### Résumé

L'exploitation offshore pétrolière en eau extra profonde (désormais jusqu'à 3000 mètres de profondeur) conduit à de nouvelles exigences pour les compagnies d'opérations d'offshore, en particulier dans le domaine du choix des matériaux. Le fait de devoir, dans des conditions d'environnement extrêmes (forte pression hydrostatique, fort gradient thermique 4°C à l'extérieur et jusqu'à 150°C à la surface du pipe), maintenir un débit d'effluent pétrolier à l'intérieur des conduites amène à une sélection sévère des matériaux utilisés pour assurer une isolation thermique passive des conduites. Dans ce domaine une attention particulière a été récemment portée sur le comportement à long terme de la zone dite de « Field joint ». Après l'assemblage des pipes par soudage, la zone non revêtue des extrémités doit être isolée thermiquement pour garantir un bon comportement thermique de l'ensemble. Ceci est réalisé par moulage ou injection d'un polymère, généralement de nature différente du matériau d'isolation utilisé sur la partie courante du pipe, sur la partie libre de revêtement, conduisant à un assemblage composite – polymère (partie appelée : Field joint).

L'objectif du travail est de développer un modèle permettant la description du comportement thermomécanique de l'assemblage. Le comportement mécanique du matériau de revêtement des pipes (généralement une mousse syntactique de polypropylène) et des matériaux utilisés dans la réalisation des Field joints sont préalablement analysés en utilisant des essais de compression hydrostatique (statique et fluage) à différentes températures et par analyse mécanique dynamique (DMA). Un modèle thermomécanique du matériau prenant en compte une déformation hydrostatique de fluage est ensuite élaboré et implémenté dans le logiciel COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup>. Un modèle global de l'assemblage dans les conditions de service est alors proposé pour prédire la distribution des déformations dans la structure. Cette distribution révèle la criticité de la zone l'assemblage entre le matériau d'isolation du pipe et le Field joint.

La dernière étape de cette étude se concentre sur la caractérisation mécanique de l'interface entre le revêtement et les matériaux du Field joint à l'aide d'un montage ARCAN modifié permettant la détermination de l'enveloppe de rupture d'un joint composite-polymère.

### Abstract

Ultra Deep offshore oil exploitation (down to 3000 meters depth) presents new challenges to offshore engineering and operating companies. Flow assurance and particularly the selection of insulation materials to be applied to pipe lines are of primary importance, and are the focus of much industry interest for deepwater applications. In this field, particular attention is now focused on the long term behavior of the assembly between coated field joints and parent coating material which appears to be critical for in-service durability. A field joint is the uncoated area that results when two pipe sections with coating cutbacks are assembled by welding. The in-service environmental conditions of the structure are severe and include high hydrostatic pressure up to 30 MPa and large thermal gradients through the thickness of the material (inner temperature up to 150°C and external temperature 4°C).

This study aims to establish a model allowing the thermomechanical behavior of the assembly to be evaluated. First, the mechanical behavior of the parent coating (usually glass syntactic polypropylene material) and coated field joint material are analyzed using hydrostatic compression tests (static and creep) at different temperatures and Dynamic Mechanical Analysis (DMA). Then, a thermo-mechanical model of the parent material allowing hydrostatic creep deformation is developed and implemented in COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup> software. A global model of the structure under service conditions is then proposed to analyze the strain distribution in the structure. This distribution highlights the critical area of the assembly which is the bond between the parent coating material and the field joint coating.

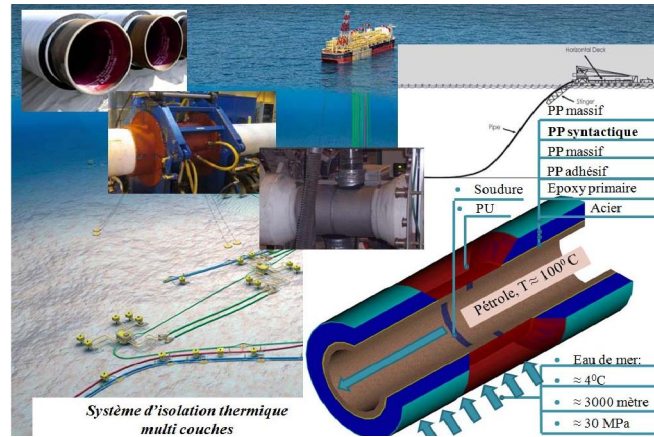
The final stage of this study focuses on the mechanical characterization of the interface between parent coating and field joint coating materials, which is addressed by using a modified ARCAN fixture allowing the determination of the failure envelope of a polymer-polymer joint.

**Mots Clés :** Field joint, isolation thermique, modèle mécanique, montage ARCAN

**Keywords :** Field joint, insulated pipeline, mechanical model, ARCAN test

## 1. Introduction

Un Field joint (Fig. 1) est la zone non revêtue qui résulte de deux sections de pipe assemblées par soudage avec absence aux extrémités de revêtement (« cut back »). Après le soudage, cette zone doit être revêtue afin de limiter les fuites thermiques et ainsi de garantir les performances de l'ensemble. La mise en œuvre de ce revêtement étant généralement réalisée in situ (sur la barge ou sur la base de pré installation) ceci conduit à des contraintes de fabrication (durée de réalisation, moyen mis en œuvre, ...) impliquant un choix de matériau de revêtement adapté.



*Fig. 1. Présentation du contexte et du « Field joint »*

En fonction de la profondeur d'exploitation, de la température de service, des techniques d'installation, de nombreux choix sont disponibles pour le matériau d'isolation de pipe : mousse de polypropylène, mousses syntactiques (billes de verre creuses noyées dans une matrice polypropylène, polyuréthane, époxy ...), élastomère, ... Différents matériaux sont également proposés pour la réalisation du Field joint. Afin de limiter la période de réalisation, le moulage de polyuréthanes est la technique la plus utilisée, mais de nouvelles techniques existent (par exemple, injection de PP, ...) [1].

Les chargements rencontrés par la zone du Field joint sont variés : le procédé de fabrication induit des contraintes résiduelles dues au chauffage local et au retrait au cours du refroidissement, des fortes sollicitations de type flexion lors de l'installation ; enfin la longue période d'exploitation (20 ans) impose un chargement de pression hydrostatique avec des gradients thermique dans l'épaisseur. Afin de prédire le comportement mécanique à long terme, il est nécessaire de disposer d'un modèle décrivant le comportement mécanique de la structure en prenant en compte le processus de vieillissement du matériau due au contact avec de l'eau [2]. Le Field joint étant un assemblage multi matériaux, pour établir ce modèle certains éléments sont nécessaires :

- caractérisation et modélisation du comportement des matériaux d'isolation,
- caractérisation et modélisation du comportement de la liaison entre les matériaux d'origine (matériau d'isolation ou d'acier revêtu) et le nouveau matériau de revêtement.

## 2. Caractérisation des matériaux

Le comportement des matériaux d'isolation a été étudié dans différents programmes [3-5]. Dans la gamme des matériaux d'isolation disponibles, les mousses syntactiques sont actuellement les plus utilisées. Ces matériaux réalisés à partir de microsphères en verre creuses (diamètre externe de 10 à 150µm, épaisseur de paroi de 1 à 1,5µm) noyées dans une matrice polymérique présentent du fait de leur composition un comportement mécanique spécifique. Le tableau 1 présente les caractéristiques nominales du matériau GSPP (Glass Syntactic Polypropylene) et la figure 2 présente une vue microscopique de la surface polie d'une mousse syntactique GSPP [6]. La pression hydrostatique est la principale composante de chargement mécanique d'une structure sous marine. Afin de

caractériser, d'une manière pertinente, le comportement des matériaux sous ce type de chargement des développements récents en termes de méthodes de caractérisation ont été initiés [7-8], en s'appuyant sur des techniques de type crush test instrumenté. Le volume des échantillons de GSPP est de  $0,5 \text{ dm}^3$  (Fig. 3). La détermination de l'évolution du module de compressibilité élastique (instantané) du matériau a été réalisée en utilisant des chargements hydrostatiques des éprouvettes dans un caisson hyperbare (Fig. 4). Les vitesses de chargement et déchargement retenue pour ces essais sont de 10 bars par minute. Les températures retenues pour ces essais sont 20, 40, 60 et  $80^\circ\text{C}$ .

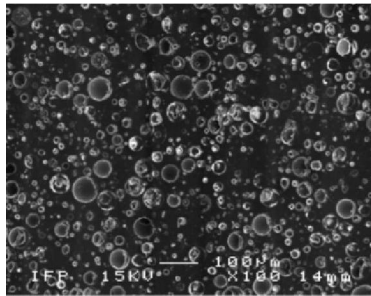


Fig. 2. Surface polie de GSPP



Fig. 3. Echantillons de GSPP

Compte tenu de la nature spécifique du matériau (isolant thermique) il est nécessaire de prendre en compte une durée de conditionnement suffisante avant le chargement pour garantir une homogénéité en température de l'échantillon et ainsi pour éviter les biais engendrés par la dilation thermique du matériau.

| GSPP                       |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Nature de matrice          | Polypropylène       |
| 3M Glass type              | S38 HS              |
| Densité                    | 0,68                |
| $T_g$ ( $^\circ\text{C}$ ) | $-36^\circ\text{C}$ |

Tab. 1. Caractéristiques du GSPP

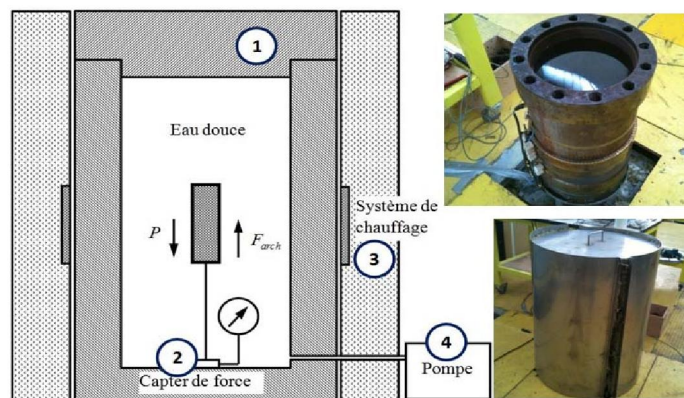
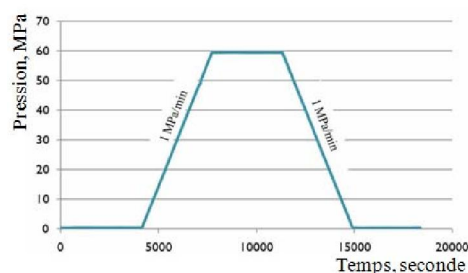
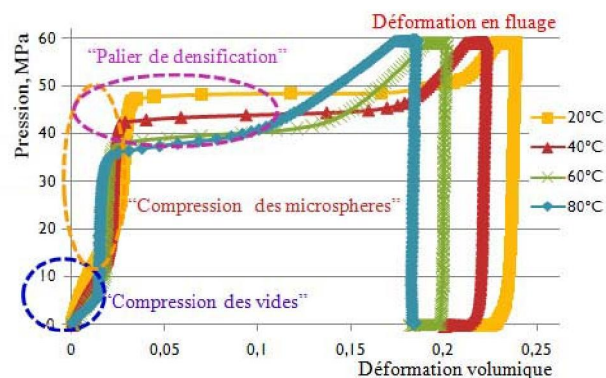


Fig. 4. Caisson hyperbare

Pour un profil de chargement présenté sur la figure 5.a, les courbes de compression hydrostatiques sont reportées sur la figure 5b.



5.a. Profil de chargement en fonction du temps



5.b. Diagramme pression hydrostatique - déformation volumique

Fig. 5. Comportement sous chargements hydrostatiques monotones à différentes températures

Le comportement du GSPP peut être séparé en quatre phases : une phase initiale de faible module, suivi par une phase associée à un fort module qui se poursuit par un plateau où un accroissement notable de la déformation volumique sans accroissement de pression est relevé. En fin de plateau, un nouvel accroissement du module de compressibilité est noté. Les quatre phases peuvent être décrites comme suit :

- Phase 1: déformation volumique entre 0 et 2%

Cette phase peut être attribuée au comportement des porosités du matériau qui sont introduites lors de la mise en œuvre. Compte tenu de la rigidité de la matrice PP, ces porosités sont comprimées à faible pression. Dans cette phase, le module de compressibilité diminue de façon presque linéaire en fonction de la température. Les limites de ces phases (pression et déformation maximales) diminuent elles aussi avec la pression, tableau 2)

- Phase 2: pression maximale inférieure à 40 - 50 MPa

Cette phase de comportement linéaire élastique est gouvernée par le comportement du matériau avant endommagement des microsphères. Il peut être noté que la limite de pression de cette phase est plus élevée à basse température qu'à température élevée. D'autre part on peut noter que la rigidité augmente avec la température.

- Phase 3: palier de densification

Cette phase est associée au palier de densification et à l'apparition d'un endommagement du matériau lié à la rupture des microsphères. La pression obtenue est celle généralement relevée comme pression de collapse du matériau. Cette pression est dépendante de la température. A température élevée, du fait de la plus faible rigidité de la matrice le transfert de charge sur les microsphères est plus important et conduit à un collapse à pression plus faible.

- Phase 4: Déformation > 15%

Cette phase correspond à la densification du matériau. La rupture totale des microsphères de verre conduit le matériau à se comporter comme un matériau massif de faible compressibilité (Polypropylène massif). Cette propriété est révélée lors de la décharge du matériau. Lors du maintien en pression à 60 MPa (1 heure) on constate une poursuite de l'augmentation de la déformation volumique, phénomène restant à expliquer (poursuite de l'endommagement, viscosité de la matrice, ...).

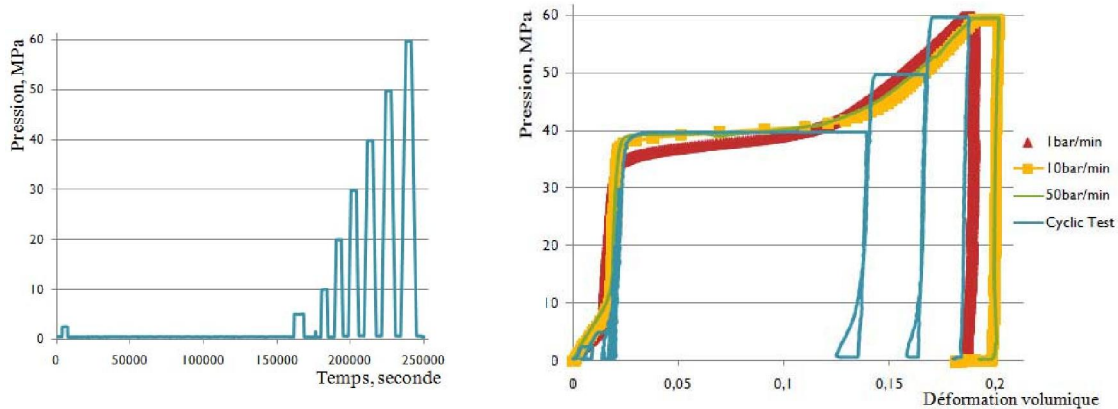
|  |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|
| <b>Température, °C</b>                           | 22,6   | 39,6   | 59,3   | 80,2   |
| <b>Pression limite de phase 1, MPa</b>           | 24,4   | 17,1   | 9,9    | 5,7    |
| <b>Déformation limite de phase 1</b>             | 0,026  | 0,021  | 0,017  | 0,013  |
| <b>Module de compressibilité de phase 1, MPa</b> | 913,3  | 750,9  | 574,0  | 382,3  |
| <b>Module de compressibilité de phase 2, MPa</b> | 4577,6 | 6350,0 | 7558,4 | 8334,7 |
| <b>Pression de palier de densification, MPa</b>  | 48,6   | 44,2   | 38,7   | 37,7   |

*Tab. 2. Chargement monotone à différentes températures*

Le matériau présente donc sous chargement hydrostatique un caractère complexe pouvant être qualifié de viscoélastique endommageable à plusieurs phases. Afin d'étudier le caractère visqueux, c'est à dire dépendant du temps, des essais à différentes vitesses ont été réalisés. Compte tenu des moyens d'essais disponibles une exploration du comportement du matériau a été entreprise entre 50 bars par minute et la vitesse minimale de 1 bar par minute. Outre l'étude du comportement visqueux ces essais ont permis d'identifier la réversibilité partielle des déformations liées au chargement hydrostatique (Fig. 6). La déformation générée au cours de la première phase (influence des porosités ou des micro-vides) présente une partie irréversible. Durant cette phase, le module de compressibilité varie peu. Cette déformation est certainement associée à la réduction de la porosité du matériau. Pour simplifier, une première modélisation de la variation de volume irréversible durant cette phase est proposée en s'inspirant des modèles de type plastique (une vérification pour des chargements plus complexes doit être réalisée).



On remarque la notion de « porosité » du GSPP dépend du niveau de chargement. A faible chargement (première phase), la porosité vient du volume des micro-vides dans le matériau. Lors de la troisième phase, la rupture des microsphères peut être associée à une augmentation de la porosité du matériau ; en effet, pour les fortes pressions hydrostatiques une augmentation de la déformation volumique est observée (Fig. 6.b).



6.a. Profil de chargement en fonction du temps

6.b. Diagramme pression hydrostatique - déformation volumique

Fig. 6. Comportement sous chargement cyclique et chargements monotones à différentes vitesses et à 60°C

Afin de construire un modèle de comportement à long terme du GSPP des essais en fluage et en recouvrance à différentes températures ont aussi été réalisés.

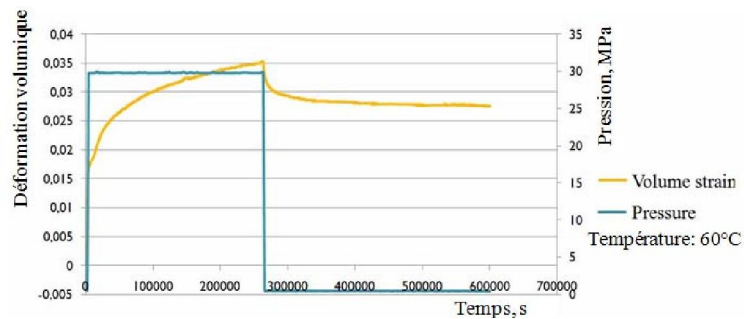


Fig. 7. Compression hydrostatique en fluage

D'après le résultat des essais de fluage à 60°C (Fig. 7), si l'on considère que le comportement du matériau est élastique linéaire, le module de compressibilité effectif initial est de 1,75 GPa et le module de compressibilité effectif relâché (temps de fluage infini) est de 0,75 GPa.

### 3. Modèle de comportement thermomécanique de matériau

A partir des résultats des essais présentés précédent, un modèle de comportement est proposé pour décrire les phases 1 et 2 du comportement. Ce modèle sera ultérieurement enrichi en intégrant le comportement endommageable du matériau.

#### 3.1. Modèle visco-thermo-élastique

En considérant le comportement spécifique des matériaux de revêtement, un modèle thermo mécanique du GSPP est proposé. Ce modèle est également applicable à d'autres matériaux syntactiques (GS époxy, GSPU, GS phenolic). Il permet de prendre en compte une déformation de fluage volumique sous chargement hydrostatique. Ce modèle a été implanté dans le logiciel COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup>. Compte tenu de l'application visée ce logiciel a été retenu afin de permettre le couplage entre les différentes physiques mises en jeu, mécanique, thermique et diffusion d'eau.

Un modèle de mousse syntactique a été initialement proposé pour représenter le comportement élastique d'un matériau combiné à un processus d'endommagement lié à la rupture des microsphères auquel était associée une déformation permanente [9]. Afin de prendre en compte le comportement visqueux, un spectre de relaxation a été introduit [10]. La forme du spectre est choisie sous forme triangulaire et donc définie par deux paramètres  $n_c$  et  $n_o$  (Fig. 8). Le taux de déformation totale est la somme du taux de déformation élastique et du taux de déformation visqueuse (Eq. 1). Le taux de déformation visqueuse est composé de plusieurs branches ( $n$  branches) qui forment le spectre de relaxation (Eq. 2-4)

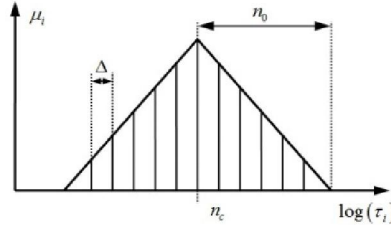


Fig. 8. Spectre de relaxation

$$\dot{\epsilon}_y = \dot{\epsilon}_y^e + \dot{\epsilon}_y^v \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\left( \dot{\xi}_{ij} \right)_n = -\frac{1}{\tau_n} \left( \left( \xi_{ij} \right)_n - \mu_n \left( \mathcal{S}_{Reff} \right)_{ijkl} \sigma_{kl} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

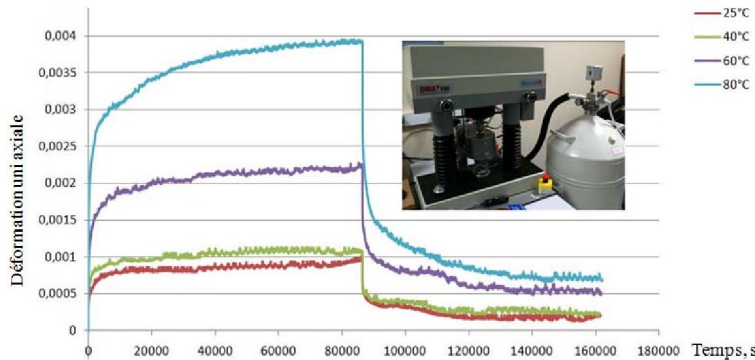
$$\dot{\epsilon}_y^v = \sum_n \left( \dot{\xi}_{ij} \right)_n \quad \text{et} \quad \dot{\epsilon}_y^e = \left( \mathcal{S}_{eff} \right)_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\left( \mathcal{S}_{eff} \right)_{ijkl} = \left( \mathcal{S}_{eff} \right)_{ijkl} \left( \frac{1}{E_{eff}}, \frac{V_{eff}}{E_{eff}}, \frac{1}{G_{eff}} \right) \quad \text{et} \quad \left( \mathcal{S}_{Reff} \right)_{ijkl} = \left( \mathcal{S}_{Reff} \right)_{ijkl} \left( \frac{A}{E_{eff}}, \frac{B V_{eff}}{E_{eff}}, \frac{C}{G_{eff}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

A, B, C représentent les rapports entre paramètres de rigidité à l'état initial et ceux à l'état relâché dans la matrice de souplesse  $\left( \mathcal{S}_{eff} \right)_{ijkl}$  et  $\left( \mathcal{S}_{Reff} \right)_{ijkl}$ .

### 3.2. Essais DMA et validation du modèle

L'Analyse Mécanique Dynamique (DMA) est une méthode efficace pour étudier les matériaux visqueux dont les propriétés mécaniques dépendent de la température, du temps et de la vitesse de sollicitation. Des essais de fluage en traction (0,5 MPa) à faible charge sont réalisés. A ce niveau de chargement il est considéré qu'aucun endommagement n'est généré. Les résultats obtenus à différentes températures sont présentés (Fig. 9). On note que sur la gamme de température (de 0°C à 100°C), le comportement du GSPP est complexe. Une relation linéaire entre la température et les paramètres du modèle est utilisée et les paramètres sont reportés tableau 3.



|                         |                                     |
|-------------------------|-------------------------------------|
| <b>E (GPa)</b>          | $-0,0118T+1,4197$                   |
| <b>v</b>                | 0,32                                |
| <b>A<sub>visc</sub></b> | $1,1504 \cdot 10^{-7} T^4 + 4,0976$ |
| <b>n<sub>c</sub></b>    | $0,0244T+2,6643$                    |
| <b>n<sub>0</sub></b>    | $0,0360T+1,7979$                    |
| <b>n<sub>b</sub></b>    | 5                                   |

Fig. 9. Essais de fluage-recouvrance en traction à différentes températures Tab. 3. Paramètres pour la modélisation

L'implantation est faite selon le schéma présenté sur la figure 11. Un exemple de résultats utilisant les paramètres précédents est présenté sur la figure 10.

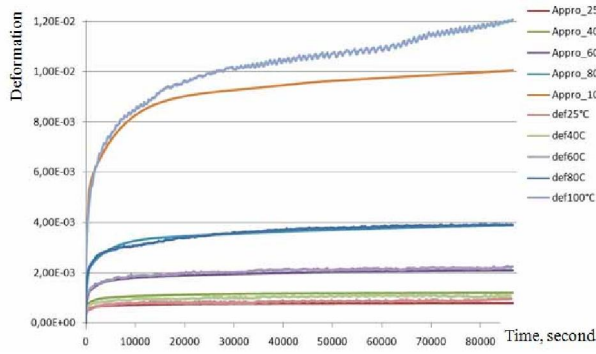


Fig. 10. Validation du modèle sur essais de fluage

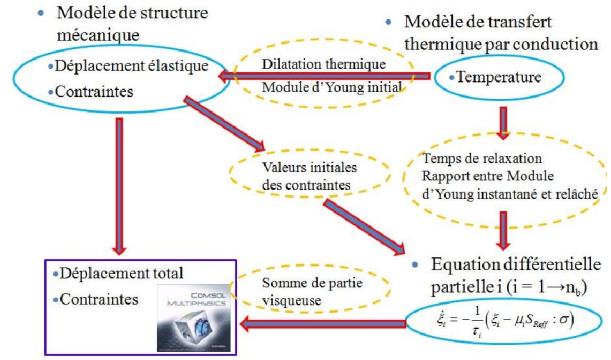


Fig. 11. Schémas de calcul dans COMSOL Multiphysics

### 3.3. Modélisation du comportement de GSPP sous compression hydrostatique cyclique

La déformation associée à la porosité initiale du matériau dépend de la température et reste faible (par exemple à 60°C la valeur maximale est de l'ordre de 1%). L'équation proposée pour décrire le comportement est telle que :

$$\frac{\partial p_{cul}}{\partial t} + \frac{1}{9K} \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \right) \cdot H \left[ - \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \right) \right] = 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

Où  $H(x)$  est la fonction d'Heaviside:  $H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases} \quad \forall x \in \mathbb{R}$

Le taux de déformation volumique totale :  $\mathcal{E}_{volumique} = \mathcal{E}_H = (\mathcal{E}_H^e + \mathcal{E}_H^p + \mathcal{E}_{cul})$  (Eq. 6)

En ce qui concerne à la consolidation, on considère que le module d'Young dépend de la déformation volumique élastique (en compression hydrostatique) et de la température :

$$\sigma_{ij} = K(\langle \text{trace } \varepsilon_M \rangle_-) \cdot (\text{trace } \varepsilon_M) \delta_{ij} + 2G(\langle \text{trace } \varepsilon_M \rangle_-) \cdot \varepsilon_{ij}^D$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E(\langle \text{trace } \varepsilon_M \rangle_-)}{3(1-2\nu)} (\text{trace } \varepsilon_M) \delta_{ij} + \frac{E(\langle \text{trace } \varepsilon_M \rangle_-)}{1+\nu} \cdot \varepsilon_{ij}^D \quad (\text{Eq. 7})$$

Où  $\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}(\text{trace } \varepsilon_M) \delta_{ij}$  et  $\langle \text{trace } \varepsilon_M \rangle_- = \begin{cases} \text{trace } \varepsilon_M & \text{si } \text{trace } \varepsilon_M \leq 0 \\ 0 & \text{si } \text{trace } \varepsilon_M > 0 \end{cases}$

Pour la première modélisation des essais sous chargements cycliques, nous proposons une relation entre le module d'Young et la déformation volumique (Fig. 12). Une nouvelle équation différentielle est ajoutée au modèle selon le schéma de calcul (Fig. 13) où sont introduites la consolidation et une déformation permanente volumique.

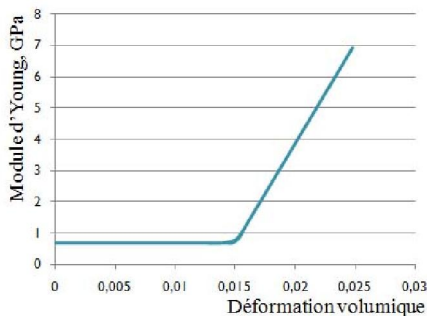


Fig. 12. Relation entre module d'Young et déformation volumique en compression

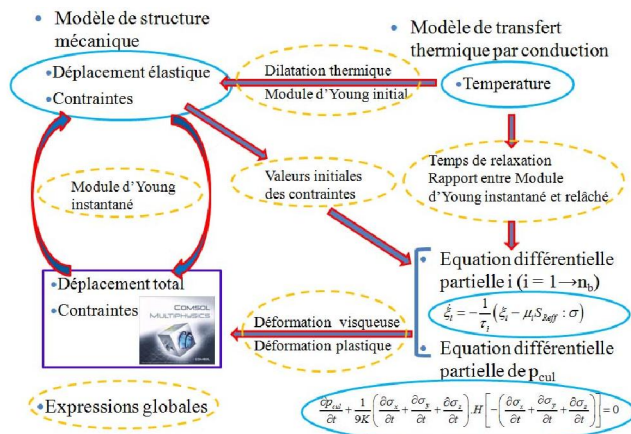
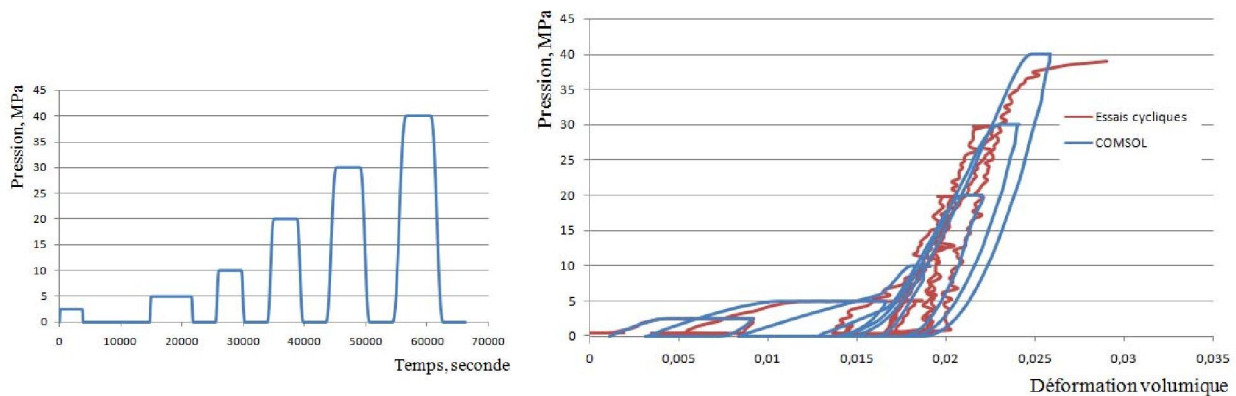


Fig. 13. Schémas de calcul dans COMSOL Multiphysics 2



Le résultat obtenu (Fig. 14) reflète d'une manière satisfaisante le comportement du matériau avant la rupture des microsphères.



14.a. Profil de chargement en fonction du temps

14.b. Diagramme pression hydrostatique - déformation volumique

Fig. 14. Validation du modèle sur l'essai en chargement cyclique

## 4 Modélisation du Field Joint

Afin d'illustrer l'intérêt du développement du modèle quelques exemples d'application sont présentés.

### 4.1. Modélisation thermique

Un modèle axisymétrique est établi pour analyser le comportement thermique du Field joint au cours de l'opération de moulage. Les propriétés thermiques des matériaux (la conductivité thermique et la capacité calorifique) sont issues d'études ultérieures [6]. Cette modélisation analyse le processus de refroidissement après l'injection de Polypropylène dans le Field joint.

Le processus de moulage se décrit en plusieurs phases successives:

- Chauffage de l'acier par l'induction
- Chauffage de l'interface par infrarouge de l'isolant thermique
- Injection de Polypropylène
- Refroidissement de Field joint par convection forcée (utilisation d'un moule refroidi à l'eau)

L'évolution de la température au cours du refroidissement à travers de la section au milieu du Field joint est présentée sur la figure 15.

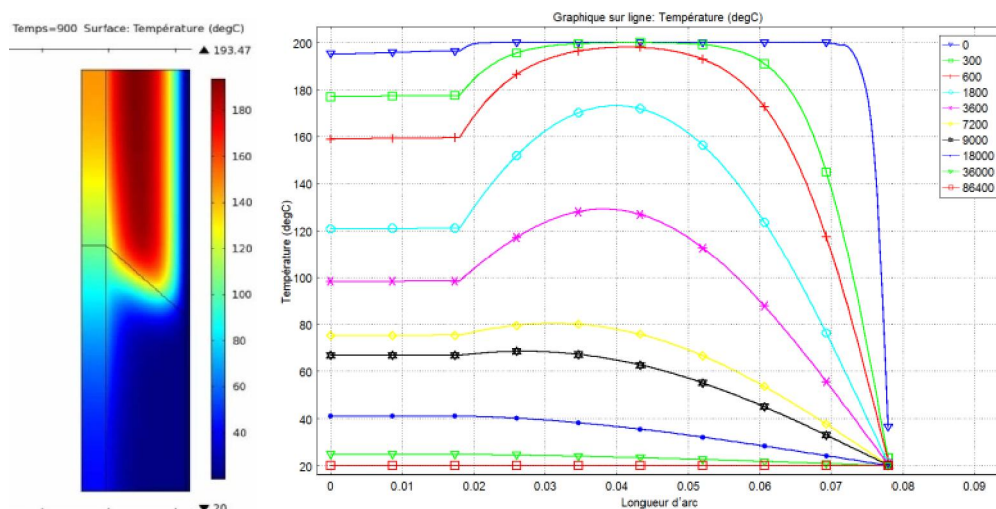


Figure 15: Variation de température au cours du moulage du PP sur le Field joint

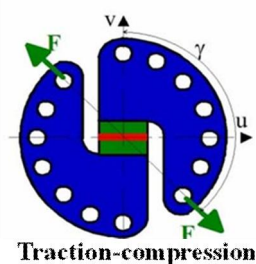
## 4.2. Modélisation de l'assemblage

Le Field joint est un assemblage multi-matériaux. La caractérisation de la liaison entre les différents matériaux est essentielle afin d'établir le comportement correct de cet assemblage. La caractérisation classique de la liaison est réalisée à l'aide du test de pelage (liaison entre l'acier et le matériau de revêtement) ou par des essais de traction sur des coupons d'échantillons prélevés dans la zone des interfaces entre les différents matériaux. Ces essais fournissent des informations très partielles et les résultats obtenus sont fortement affectés par les conditions d'essai et les effets de bords liés à la géométrie des éprouvettes. Ils ne sont souvent utilisés comme tests de contrôle qualité. Afin d'accéder aux données nécessaires à la réalisation d'un modèle global de Field joint, l'utilisation d'un montage Arcan est envisagée. Cet essai permet de déterminer l'enveloppe de rupture d'un assemblage, en couvrant différentes conditions de chargement de traction/compression-cisaillement (Fig. 16).

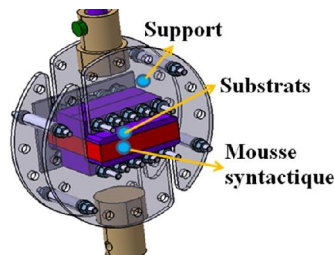
Il a été montré que l'utilisation de géométries spécifiques permet de limiter fortement l'influence des effets de bord pour les assemblages collés et ainsi permet d'obtenir des résultats expérimentaux « fiables » pour caractériser le comportement mécanique des assemblages collés [11-12]. Un montage de type Arcan modifié (Fig. 17) a été conçu afin de caractériser le collage de grandes surfaces (140x70 mm) et pour caractériser le comportement mécanique des liaisons de type "polymère-polymère".

En préalable aux essais, il est nécessaire d'optimiser la géométrie des éprouvettes pour limiter les concentrations de contraintes. Les contraintes de réalisation des éprouvettes doivent être prises en compte, afin de concevoir des éprouvettes représentatives des structures industrielles. Une attention particulière doit être accordée aux contraintes résiduelles induites par le processus de fabrication.

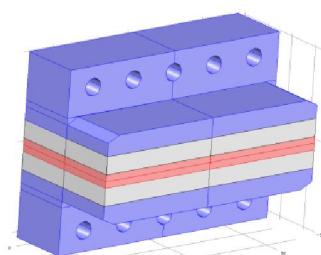
Dans une première étape, un échantillon PU-GSPP est proposé (Fig. 17). Une plaque de PU est moulée entre deux plaques de GSPP collées sur des supports en aluminium. Ces éprouvettes sont réalisées par moulage basse pression qui est le procédé de mise en œuvre utilisé sur site.



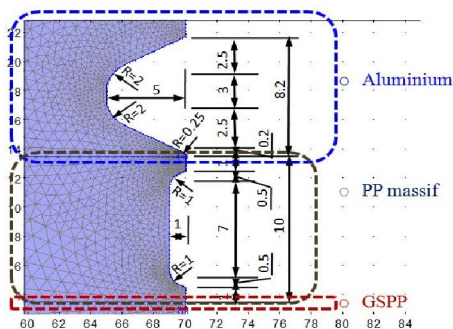
*Figure 16: Montage Arcan*



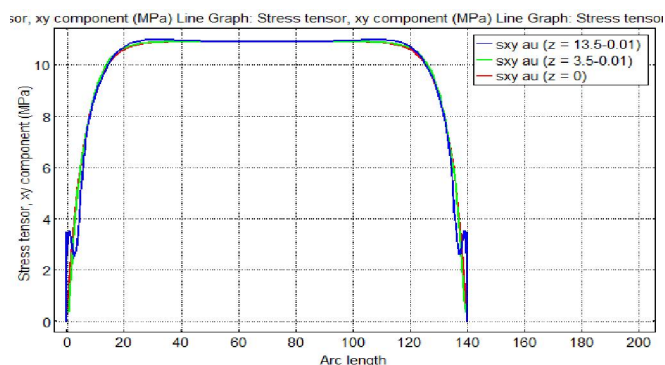
*Figure 17: Montage Arcan pour échantillons de GSPP-PU*



L'utilisation de becs (Fig. 18) permet de limiter les contraintes dans la périphérie de l'assemblage étudié en limitant ainsi l'influence des défauts sur les résultats expérimentaux. La figure 19 présente l'évolution de la répartition de la contrainte de cisaillement dans la zone utile de l'éprouvette pour un chargement de cisaillement. Une optimisation de l'essai en cours.



*Figure 18: Géométrie du bec de GSPP-PP*



*Figure 19: Evolution de contrainte de cisaillement*

## 5. Conclusions

L'exploitation offshore pétrolière en eau extra profonde nécessite l'utilisation de systèmes de protection thermique performants ; en particulier, cette étude est associée à l'étude du comportement du Field joint qui est la partie la plus critique des pipes. Le comportement mécanique du matériau d'isolation thermique dépend de la température et du type de chargement, en particulier du chargement hydrostatique lié à l'utilisation en eau profonde. Ainsi des essais spécifiques, pour différentes températures, ont été réalisés dans un caisson hyperbare. Ces essais permettent d'analyser l'évolution des déformations volumiques en fonction du temps et de la pression hydrostatique utilisée. Le comportement de type fluage du matériau a été modélisé en utilisant un modèle de type viscoélastique et les premiers résultats numériques, obtenus à partir d'un code éléments finis COMSOL Multiphysics sont encourageants.

La rupture des microsphères incluses dans le matériau, en fonction du niveau de chargement (pression hydrostatique), peut être modélisée en utilisant une variable d'endommagement (modèle homogénéisé) [10] mais nécessite des essais complémentaires.

La modélisation du comportement de l'assemblage (Field joint) en service nécessite aussi la prise en compte du comportement des liaisons entre les différents matériaux utilisés (matériaux de protection thermique et l'acier du pipe). Pour caractériser le comportement de ces assemblages composites-polymères des essais utilisant un montage Arcan modifié sont en cours pour analyser l'influence des sollicitations de traction-cisaillement sur le comportement de l'assemblage.

## Références

- [1] La Fontaine, « Field Joint Coating Systems for Multilayer and Thermally Insulated Pipelines ». *Pipeline coating*, 2009.
- [2] Lefebvre et al, « Durability of syntactic foams during aging in severe conditions: modeling of water uptake and ingress in order to predict buoyancy and thermal conductivity evolutions ». *Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 64, No. 2, pp. 165-178, 2009.
- [3] Jackson et al, « On the effect of increasing microballon loadings on thermal and hydrostatic performance of Glass Syntactic polyurethanes ». *Pipeline Protection*, 2007.
- [4] Choqueuse et al, «How to provide relevant data for the prediction of long term behavior of insulation materials under hot/wet conditions ? ». *Offshore technology conference OTC 16503*, 2004.
- [5] Watkins et al, « Foam Thermal Insulation for Ultra-Deepwater Oil and Gas Pipelines ». *Offshore technology conference OTC 13134*, 2001.
- [6] Bouchonneau et al, « Experimental testing and modeling of an industrial insulated pipeline for deep sea application ». *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 73, Issues 1-2, pp. 1-12, 2010.
- [7] Grosjean et al, « Comprehensive analyses of syntactic foam behaviour in deepwater environment ». *Journal of Material Science*, Volume 44, No. 6, pp. 1462-1468, 2009.
- [8] Choqueuse et al, «Mechanical behavior of syntactic foams for deep sea thermally insulated pipeline ». *Applied Mechanics and Materials Vols. 24-25*, pp. 97-102, 2010.
- [9] Choqueuse et al, «Modeling approach for damageable mechanical behavior of glass/polymer syntactic foams under hydrostatic pressure ». *Syntactic and Composite Foams II*, 2006.
- [10] Perreux et al, « Amélioration d'un modèle de comportement de mousse syntactique pour application d'isolation ». *Ifremer contrat 2008-2-20664127*, 2008.
- [11] Cognard et al, « A study of the non-linear behaviour of adhesively-bonded composite assemblies ». *Composite Structures 76*, pp. 34-46, 2006.
- [12] Cognard, « Numerical analysis of edge effects in adhesively-bonded assemblies application to the determination of the adhesive behaviour ». *Computers and Structures 86*, pp. 1704-1717, 2008.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Région Bretagne pour le financement de ce travail.